

# J-MAP船舶・燃料研究

## －試験進捗－

J-MAP船舶・燃料研究WG

## 低硫黄燃料油の品質確保にかかる燃焼試験について

- 船用燃料油のアベイラビリティの拡大を図るべく、低硫黄化に伴う性状変化が現行C重油を使用している船用エンジンに影響しないかを確認するため、実機による実際の使用を想定した燃焼試験を実施。
- 石油連盟及び日本船用工業会間で調整の結果、以下の試験燃料について燃焼試験を行う。
- また試験燃料毎に、特性の異なる複数の船用エンジンで燃焼試験を行う。

現行の船用燃料油と低硫黄化に伴う変化

現行	低硫黄化 (3.5%以下→0.5%以下) による性状変化	試験の要否
軽油	変化なし	不要
<b>A重油</b> ・着火性: セタン指数40程度 ・動粘度: 2~20mm <sup>2</sup> /s	硫黄分以外変化なし	不要
<b>C重油</b> ・着火性: CCAI860程度 ・動粘度: 50~180mm <sup>2</sup> /s	着火性や動粘度に 変化あり ・着火性:CCAI 860/ セタン指数35程度 ・動粘度:2~180mm <sup>2</sup> /s	性状変化の影響を評価する 試験が必要

試験燃料の性状

試験燃料	動粘度 (mm <sup>2</sup> /s)	着火性	備考
試験燃料① (A重油に 近いもの)	2~20	セタン指数 35程度	・着火性、動粘度 を最も大きく変 化させた燃料
試験燃料② (①と③の 中間)	20~50	CCAI 860 /セタン指 数35	・動粘度によって ヒーティングレ ベルが変わるた め動粘度を①と ③の中間にした 燃料
試験燃料③ (現行の C重油)	50~180	CCAI 860 程度	・基準燃料とする

(注) セタン指数(CI:Cetane Index)・・・軽油やA重油の着火性を示す指標。 CCAI ...C重油の着火性を示す指標。

(※) 着火性及び動粘度レベルに変化がないC重油については、試験燃料③で評価する(低硫黄化燃料であっても、燃焼性は同等と判断)。

## 試験燃料性状のねらい

### 想定シナリオ

現行、高硫黄C重油を使用している船舶が、C重油の代替として低硫黄燃料油を使用する状況を想定する。このため、現状のC重油を使用する場合の運転方法と同様に、A重油で起動した後に試験燃料に切替える。

### 試験燃料①: A重油に近い燃料油 (CI 35程度、動粘度2~20 mm<sup>2</sup>/s)

Point: 着火性と動粘度を最も大きく変えた燃料

➡ 起動時に従来のA重油を使用すれば、現在のC重油と同じように使用可能であることを確認。

### 試験燃料②: 中間動粘度燃料油 (CCAI 860 / CI 35程度、動粘度20~50 mm<sup>2</sup>/s)

Point: 動粘度に着目した燃料

➡ ①と③の中間レベルの燃料。低動粘度で、従来のC重油とは加熱条件が変わるが、適切に加熱すれば、問題なく使用できることを確認。

### 試験燃料③: 現行C重油相当燃料油 (CCAI 860程度、動粘度50~180 mm<sup>2</sup>/s)

Point: 基準燃料

➡ 着火性及び動粘度レベルに変化のない低硫黄C重油については、試験燃料③で評価する。

## 2. 燃焼試験に用いる試験燃料

### 試験燃料の性状

名称		試験燃料①	試験燃料②	試験燃料③
密度@15°C (g/cm <sup>3</sup> )		0.8835	0.9408	0.9855
動粘度 (mm <sup>2</sup> /s)	@40°C	2.43	---	---
	@50°C	2.03	35.2	153
	@75°C	---	15.1	45.0
流動点 (°C)		-42.5	-22.5	-5.0
引火点 (°C)		73.0	87.5	126.5
水分 (容量%)		0.03>	0.03>	0.27
残留炭素分 (質量%)		0.02	7.54	11.5
灰分 (質量%)		0.001>	0.001>	0.006
硫黄分 (質量%)		0.16	1.06	2.42
セタン指数(新)		35.4	---	---
CCAI		---	833	857

(※) 燃料性状としては動粘度、着火性に着目し、燃焼性に影響しない硫黄分は規制値適合を条件としない

# 3. 燃焼試験に用いるエンジン

○今年度は、2つの4サイクルエンジンについて、燃焼試験を実施。

No.	1	2	
タイプ	4サイクル中速エンジン		
型式	新潟原動機 6L19HX	マツイ鉄工所 MU323DGSC	
定格出力／回転数	750 kW / 1000 rpm	257 kW / 420 rpm	
シリンダ数	6気筒	3気筒	
シリンダ径 × ストローク	190 × 260 mm	230 × 380 mm	
燃料噴射系	開弁圧力	35.0 MPa	25.5 MPa
	噴射ノズル	φ0.32 × 9穴-噴射角140°	φ0.32 × 7穴-噴射角120°
搭載船例	499GT	199GT	
外観			
特徴	中速エンジンの中で、機関回転速度が速く、ボア径の小さい機関のサンプル。機関回転速度が速いため、燃焼期間に余裕がなく、燃料性状の変化に敏感である。	中速エンジンの中で、機関回転速度が遅い機関のサンプル。機関回転速度が遅いため、燃焼期間に余裕があり、No.1エンジンに比して燃料性状の変化に鈍感である。	



# 5. 今年度燃焼試験 条件・計測マトリックス

燃料	試験燃料性状		試験条件*		計測項目	
	動粘度 mm <sup>2</sup> /s (50°C)	着火性	エンジン 運転条件	燃料噴射前 加熱条件	エンジン	エミッション
①	2 - 20	CI 35	船用特性 25% 50% 75% 100%	加熱なし	燃料噴射圧 筒内圧 熱発生率 着火遅れ 燃料温度 排ガス温度 冷却水温度 燃料消費量 ・ ・ ・	NOx CO <sub>2</sub> CO O <sub>2</sub> THC スート PM [EC,OC]** スモーク
②	20 - 50	CCAI 860 /CI 35		燃料加熱温度を適切に設定して実験を実施。 →メーカー推奨の動粘度範囲内に設定***		
③	50 - 180	CCAI 860		メーカー推奨の動粘度範囲内に設定		

\* エンジン及び付帯設備の性能要件により、一部実験条件が変更となる可能性があります。

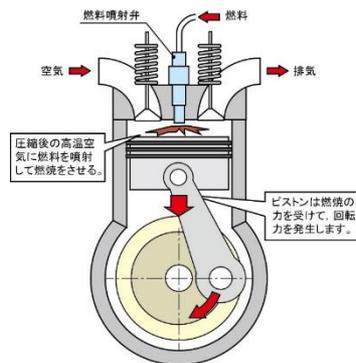
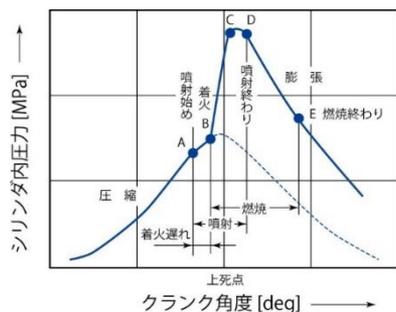
\*\* PM計測は、エンジン1の夏季実験時のみ。

\*\*\* 各エンジンメーカーの仕様による。C重油の場合、通常は10～20mm<sup>2</sup>/sの範囲内でエンジンごとに指定されている。

○ 負荷率25%(従来のC重油で注意が必要な負荷率), 50%, 75%, 100%(50%以上が航海中の主な負荷率)の負荷率において, 十分に安定させた状態で圧力波形や排ガス温度, 排ガス性状などを計測する。

## (a) 着火遅れ・最高シリンダ内圧力

燃料の着火性を評価する指標の一つに着火遅れ(燃料を噴射してから着火するまでの期間)や最高シリンダ内圧力Pmaxがある。



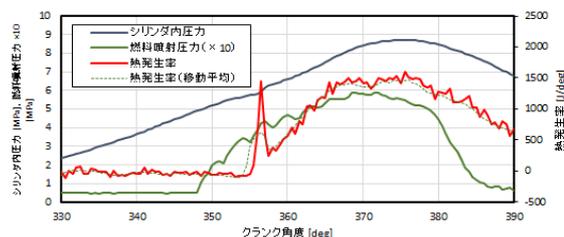
## (c) その他

その他の評価指標として, 排ガス温度や過給機特性, 排ガス性状などがある。

## (b) 圧力波形・熱発生率

シリンダ内圧力波形や熱発生率 $dQ/d\theta$  [J/deg]を詳細に分析することで, 燃料の燃焼状態を調べることができる。

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{V}{\kappa - 1} \frac{dP}{d\theta} + \frac{\kappa P}{\kappa - 1} \frac{dV}{d\theta}$$



作成: 2018/7/6

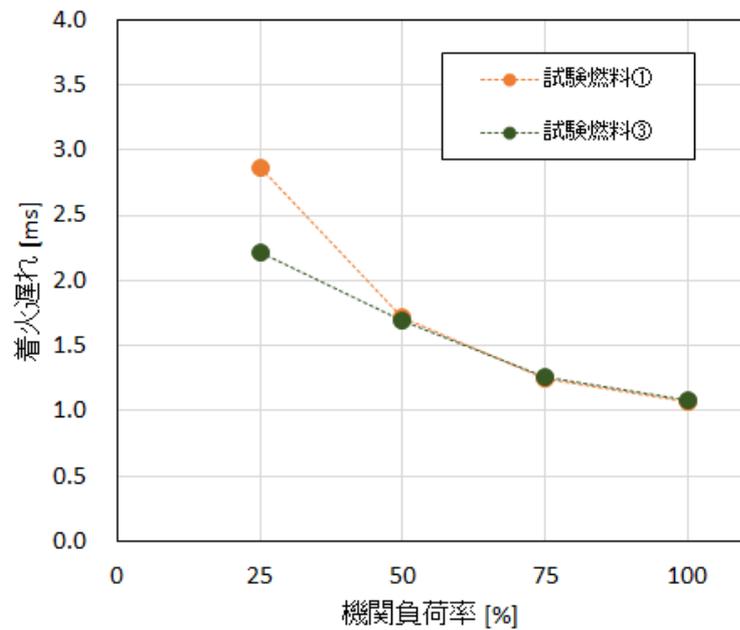
燃焼試験結果【サンプル】

計測日: 2018/7/4  
 試験機: 高学機工研 ML3230G30(エンジンNo.2)  
 燃料: A重油(0008), センサ種類: 40.0, 登録番号(1):

分類	項目	単位	計測値				備考
			25	50	75	100	
計測	設定負荷率	%	25	50	75	100	
	計算開始時刻		16:00	15:30	15:00	14:30	
	計算終了時刻		16:05	15:35	15:05	14:35	
	燃焼室温度	°C	30.8	30.9	31.2	31.2	
	燃焼室圧力	MPa	47.0	44.0	39.0	44.0	
	燃焼室圧力	MPa	994.9	994.8	995.0	995.3	
	エンジン回転数	rpm	284.7	331.0	379.9	416.8	
	軸出力	kW	44.5	129.2	192.9	255.3	
	過給機入口空気温度	°C	---	---	---	---	センサ不具合
	中間冷却器空気入口温度	°C	45.3	71.6	100.1	131.6	
中間冷却器空気出口温度	°C	35.5	34.6	35.1	41.9		
燃室圧力	kgf/cm <sup>2</sup>	0.0493	0.320	0.606	0.924		
排ガス温度 No.1	°C	339.9	439.2	471.8	530.8		
排ガス温度 No.2	°C	350.8	438.3	504.9	560.3		
排ガス温度 No.3	°C	355.5	404.8	458.0	493.8		
タービン前温度	°C	408.5	522.8	589.6	649.9		
タービン後温度	°C	371.4	474.7	522.7	560.8		
燃料温度	°C	35.2	37.1	36.1	35.3		
燃料流量	L/min	18.2	34.5	51.7	70.0		
機関冷却水入口温度	°C	58.8	58.3	58.1	58.2		
中間冷却器水入口温度	°C	28.5	29.2	29.3	29.2		
排気管No.1	mm	2.58	2.58	2.21	1.89		
排気管No.2	mm	2.83	2.80	2.15	1.80		
排気管No.3	mm	3.04	2.45	2.21	1.89		
シリンダ内最高圧力 No.1	MPa	6.38	7.89	8.41	9.00		
シリンダ内最高圧力 No.2	MPa	6.57	7.87	8.35	8.94		
シリンダ内最高圧力 No.3	MPa	6.40	7.56	8.28	8.89		
CO濃度	ppm	125.1	317.4	350.1	493.5		
CO <sub>2</sub> 濃度	%	7.17	8.18	8.47	8.72		
NO <sub>x</sub> 濃度	ppm	1755.5	1473.3	1261.0	1128.6		
CH <sub>4</sub> 濃度	%	10.88	9.48	9.07	8.74		
THC濃度	ppm	38.9	33.1	33.3	33.1		
SO <sub>x</sub> 濃度	ppm	25.3	27.9	---	---	一部未計測	
H <sub>2</sub> O濃度	%	8.01	8.75	---	---	一部未計測	
スート濃度							
スモーク							

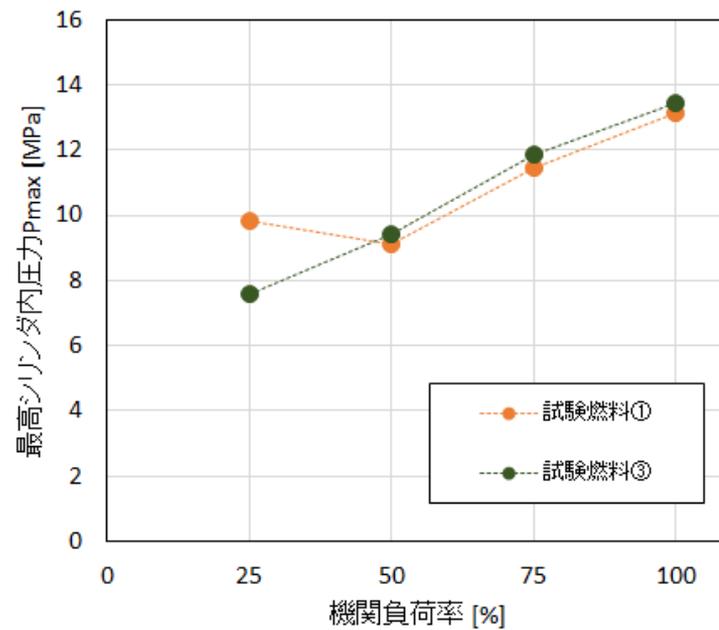
【コメント欄】

## (1) 着火遅れ・最高シリンダ内圧力



(a) 着火遅れ

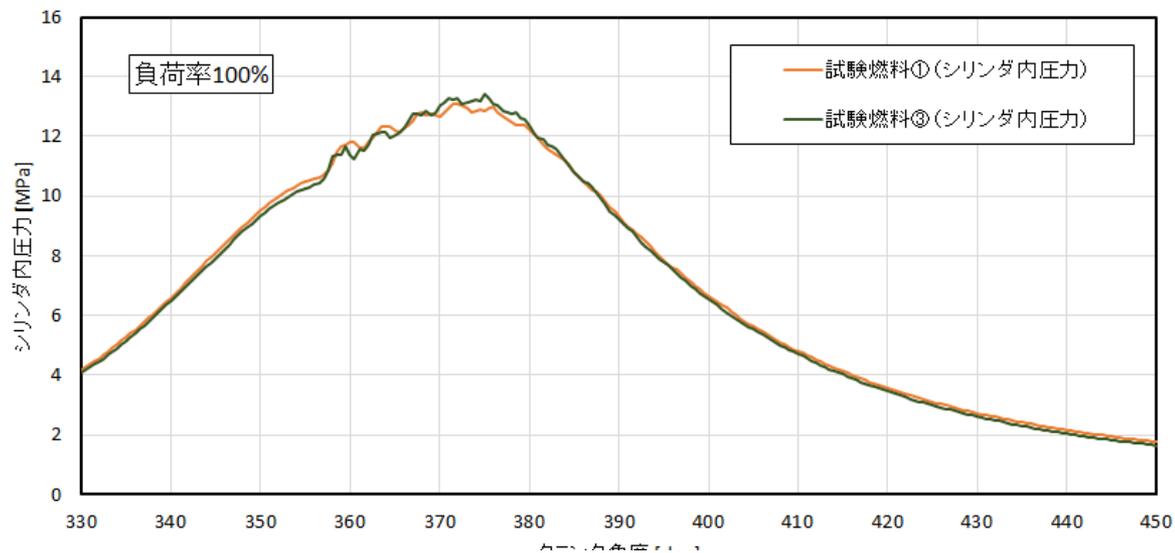
- 負荷率50%以上の範囲において、試験燃料①の着火遅れは試験燃料③とほぼ同じである。
- 負荷率25%における試験燃料①の着火遅れは試験燃料③よりも大きい。



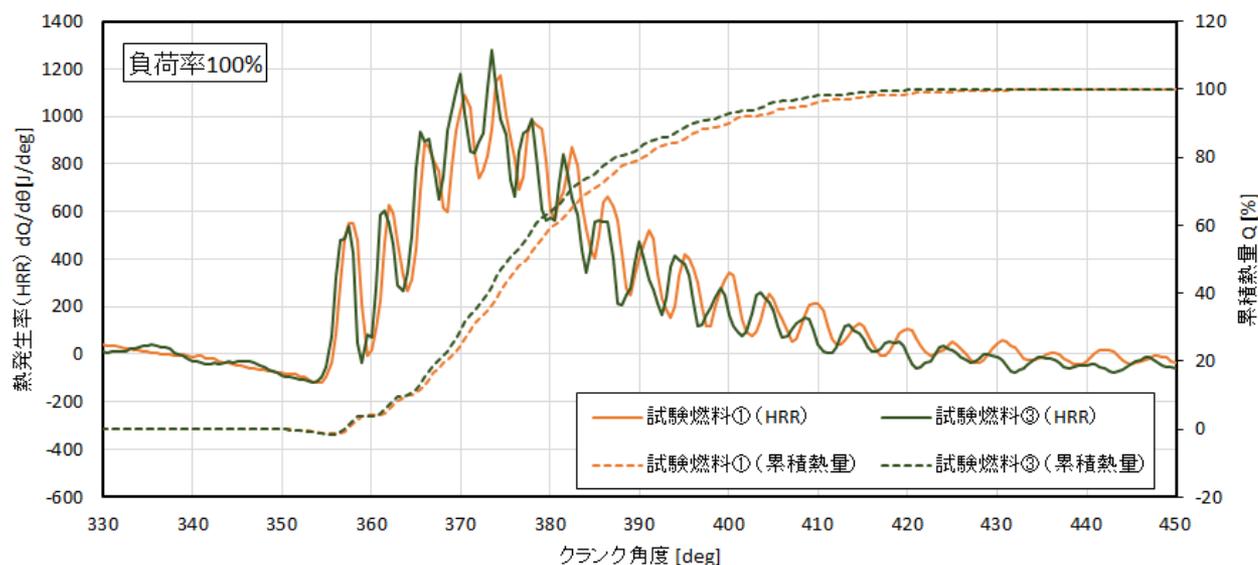
(b) 最高シリンダ内圧力Pmax

- 負荷率50%以上の範囲において、試験燃料①の最高シリンダ内圧力は試験燃料③よりもわずかに低い。
- 負荷率25%における試験燃料①の最高シリンダ内圧力はやや高い(圧力波形参照)。

## (2) 圧力波形および熱発生率(負荷率100%)



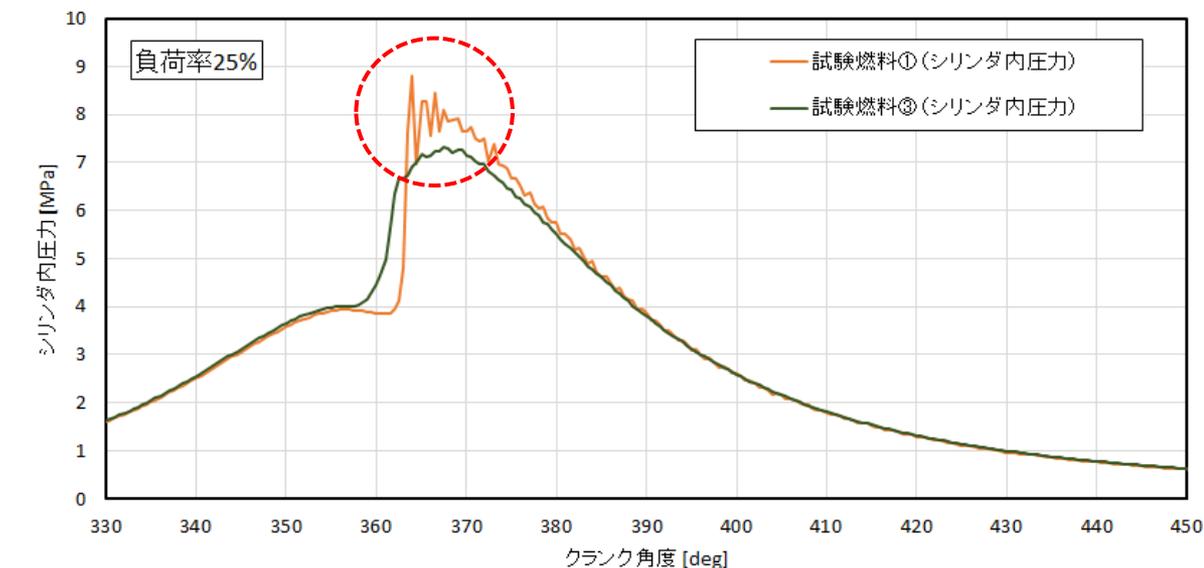
➤ 負荷率100%における試験燃料①と試験燃料③の圧力波形はほぼ重なっている。



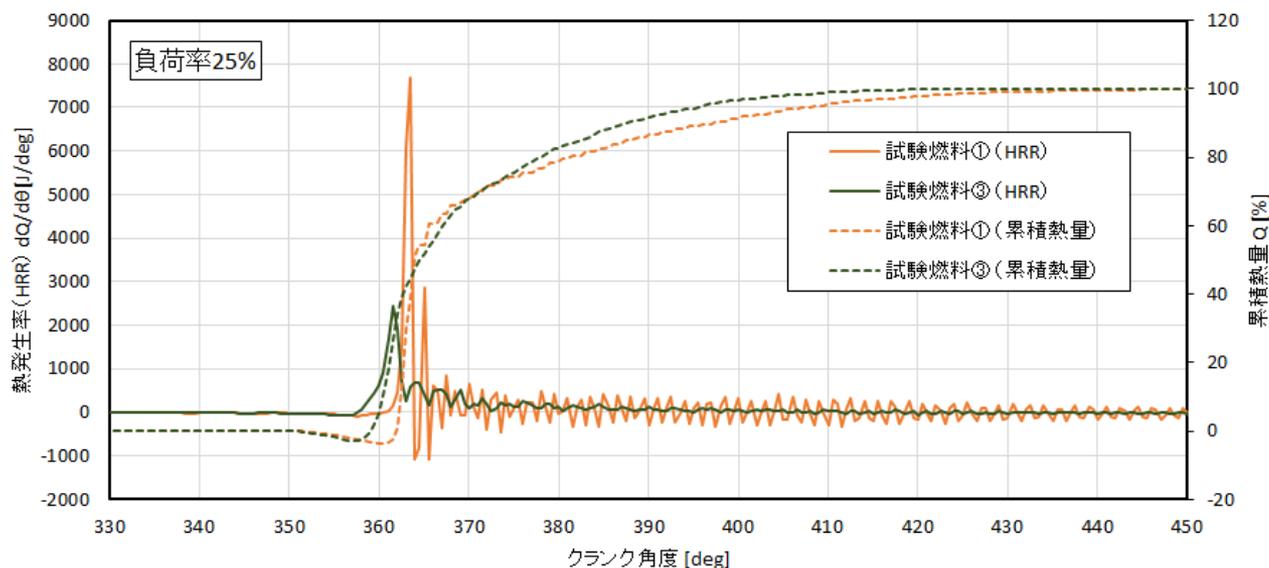
➤ 負荷率100%における熱発生率および累積熱量(燃焼期間に相当)は、燃料の影響をほとんど受けないことを確認した。

➤ 負荷率50%, 75%もほぼ同様の結果が得られており、圧力波形や熱発生率は燃料の影響をほとんど受けないことを確認した。

## (3) 圧力波形および熱発生率(負荷率25%)

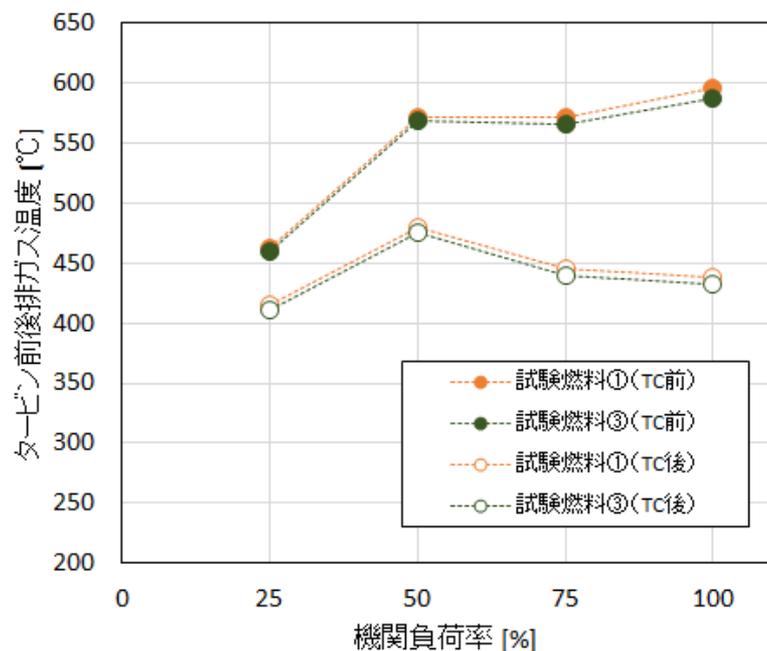


- 負荷率25%における試験燃料①と試験燃料③の圧力波形は大きく異なる。
- 負荷率25%における試験燃料①の最高シリンダ内圧力は高く, 変化率が大い。(ディーゼルノックの現象が現れている。)

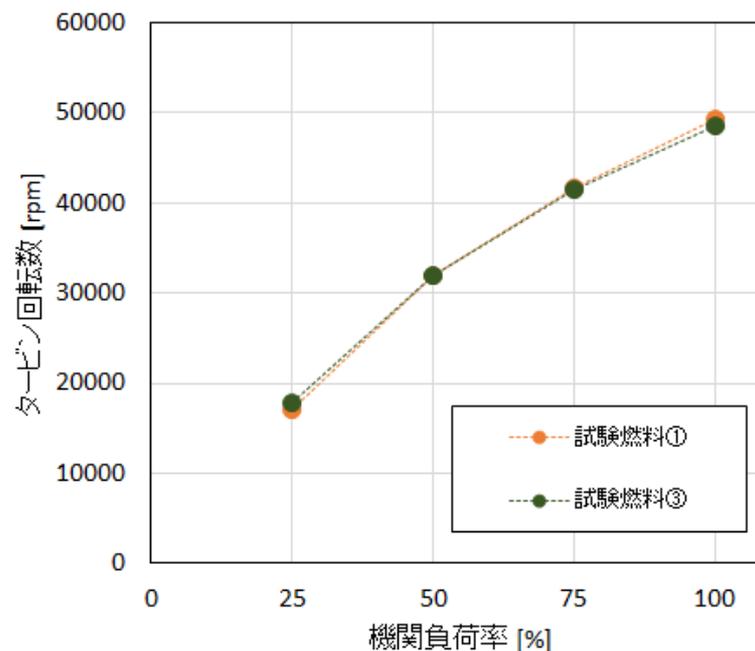


- 負荷率25%における熱発生率および累積熱量には, 燃料の影響が現れている。

## (4) 排ガス温度・過給機特性



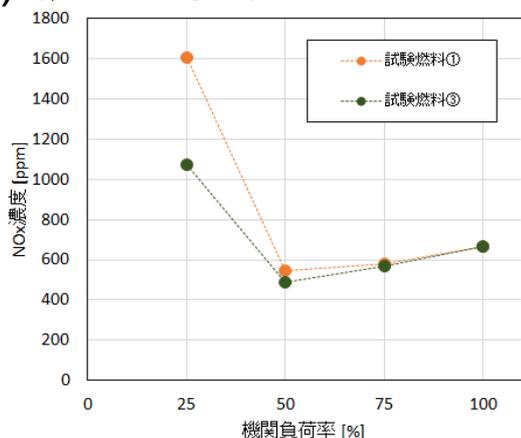
(a) タービン前後排ガス温度



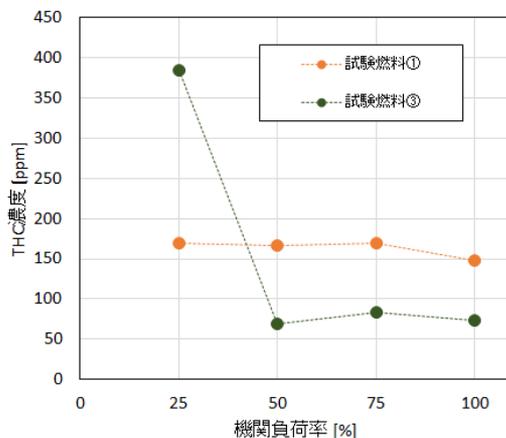
(b) タービン回転数

- タービン前後排ガス温度やタービン回転数は、燃料の影響をほとんど受けないことを確認した。

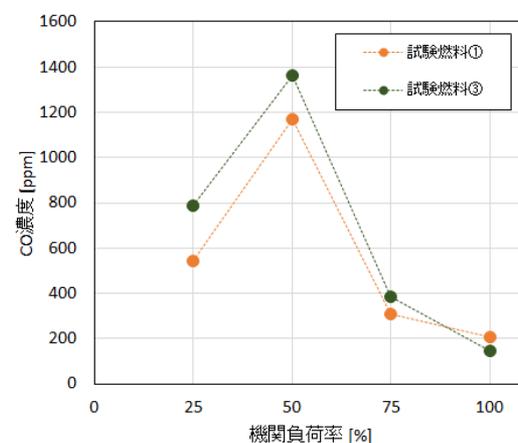
## (5) 排ガス性状



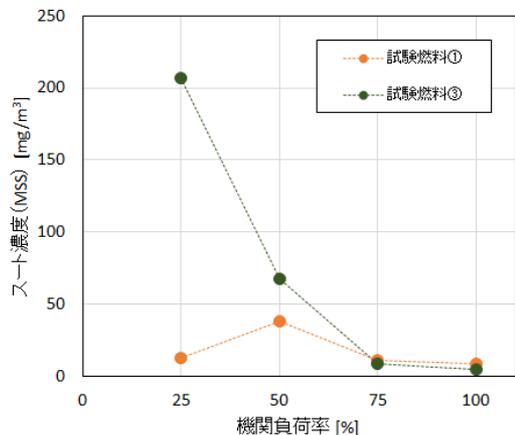
(a) NOx濃度



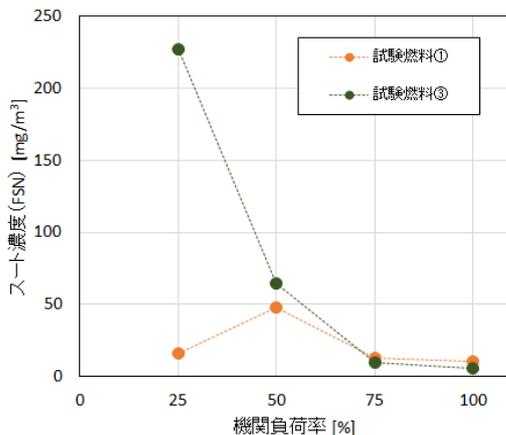
(b) THC濃度



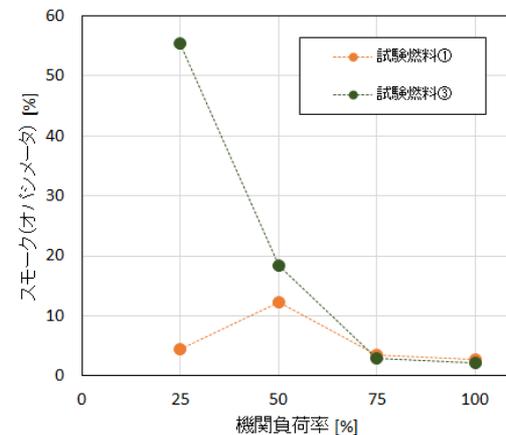
(c) CO濃度



(d) スート濃度 (MSS)



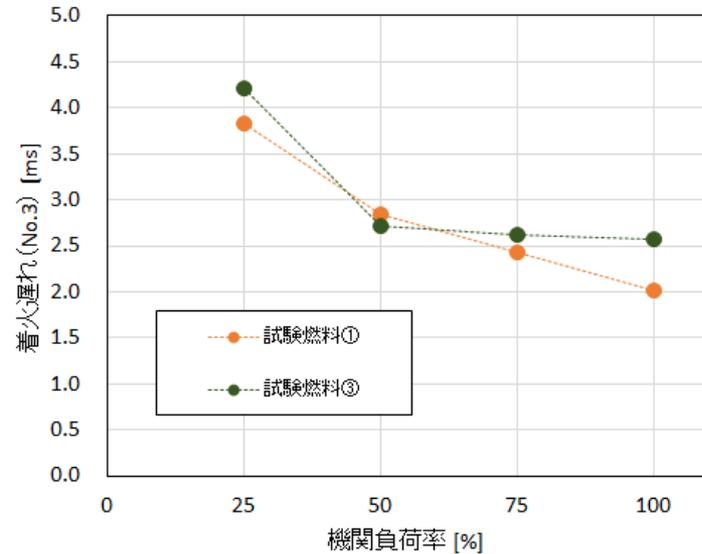
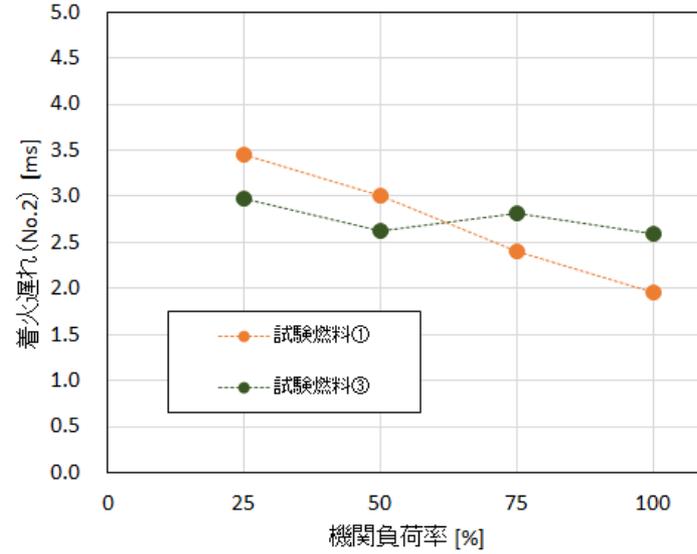
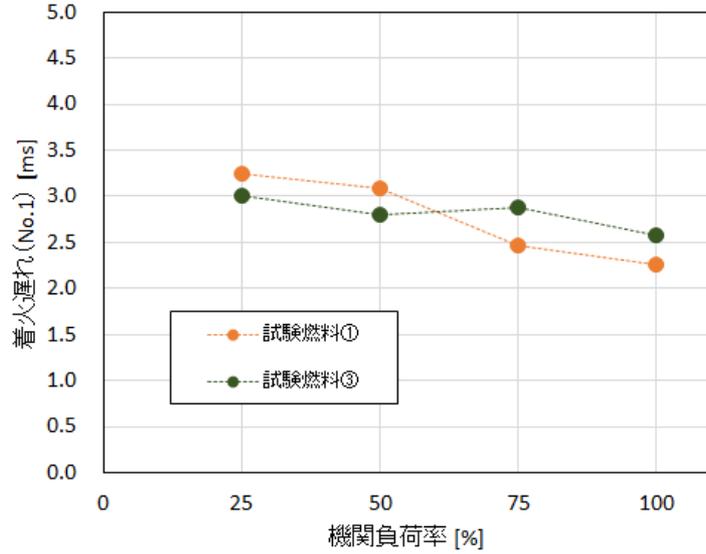
(e) スート濃度 (FSN)



(f) スモーク濃度

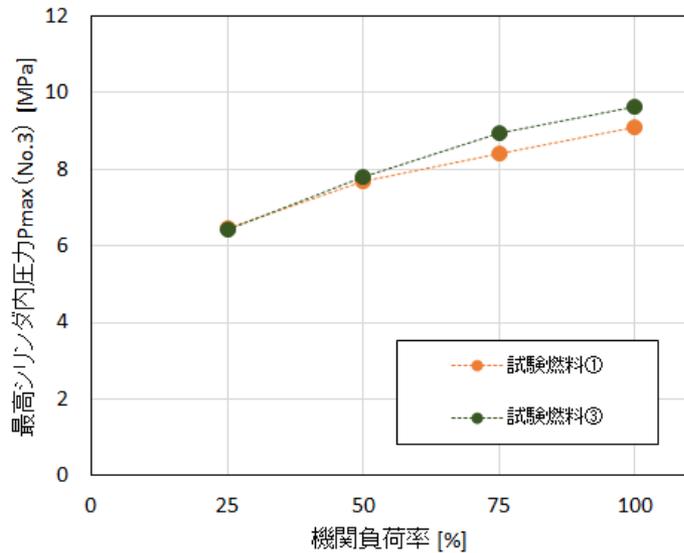
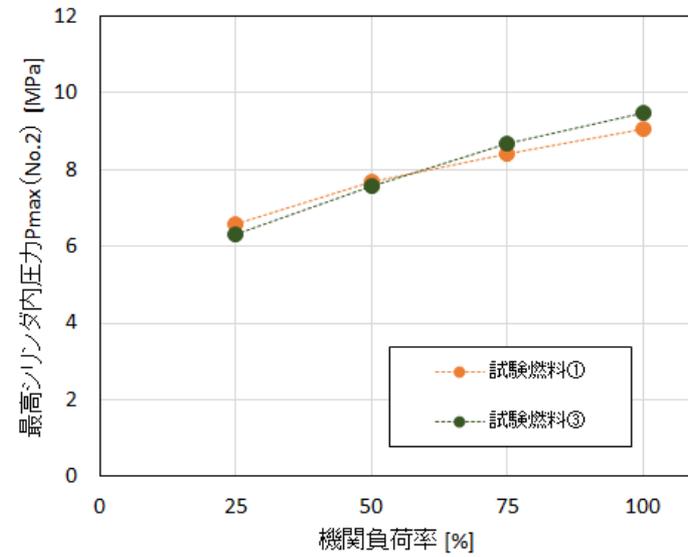
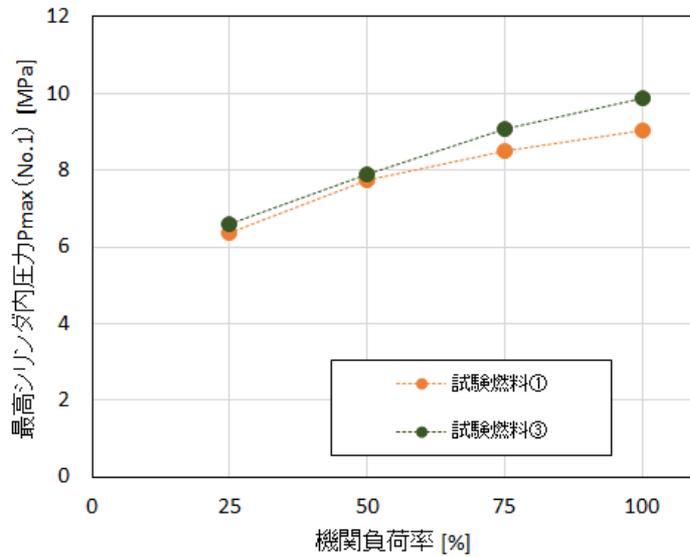
- 負荷率50%以上の範囲において、試験燃料①の排ガスは試験燃料③とほぼ同じ／問題ないレベルである。
- 試験燃料①の負荷率25%におけるスート濃度およびTHC濃度は試験燃料③と比べて低い。
- 試験燃料③の負荷率25%におけるスート濃度は注意すべきレベルである。

## (1) 着火遅れ



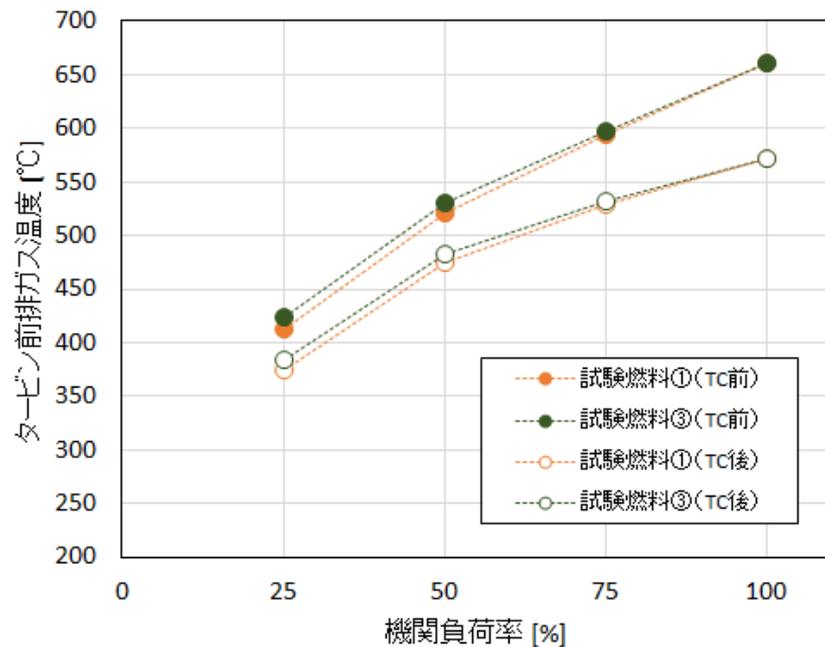
➤ すべての負荷域において、試験燃料①の着火遅れは試験燃料③と同程度である。

## (2) 最高シリンダ内圧力

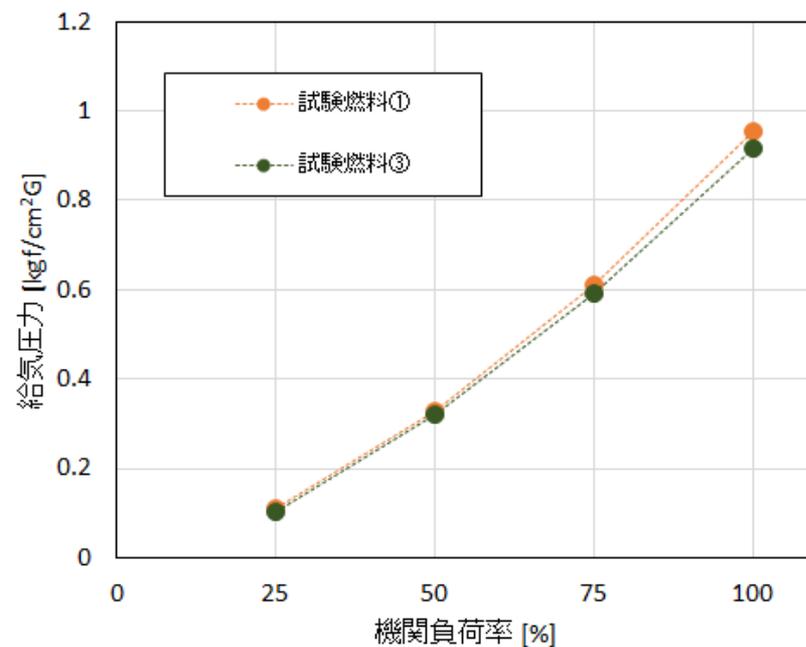


➤ 試験燃料①の最高シリンダ内圧力は試験燃料③と同程度である。

## (3) 排ガス温度・過給機特性



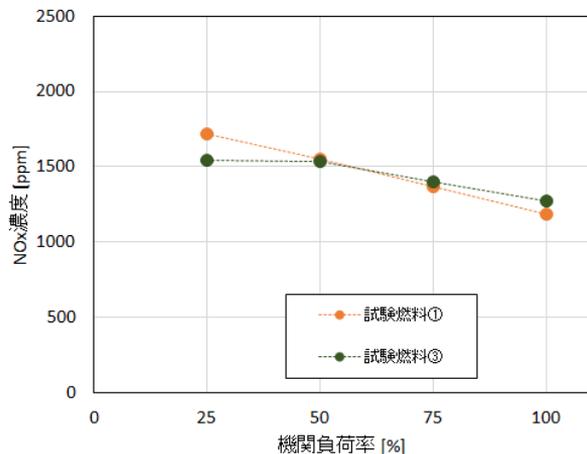
(a) タービン前後排ガス温度



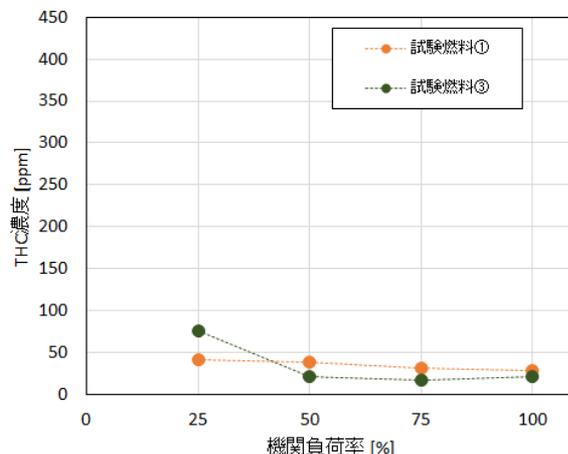
(b) 給気圧力

- タービン前後排ガス温度および給気圧力は、燃料の影響をほとんど受けないことを確認した。

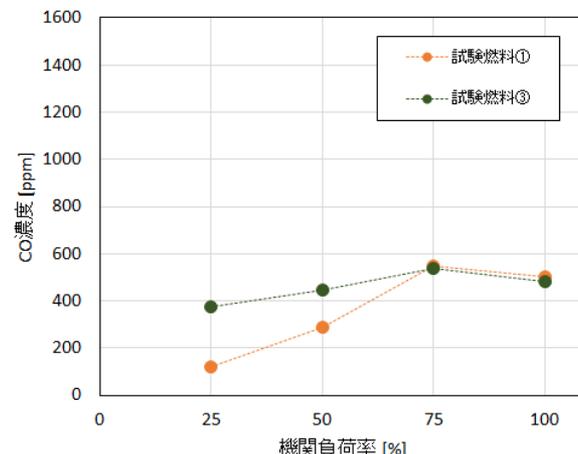
## (4) 排ガス性状



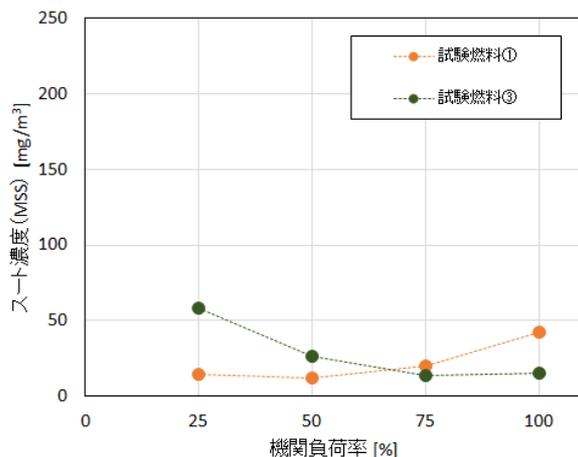
(a) NOx濃度



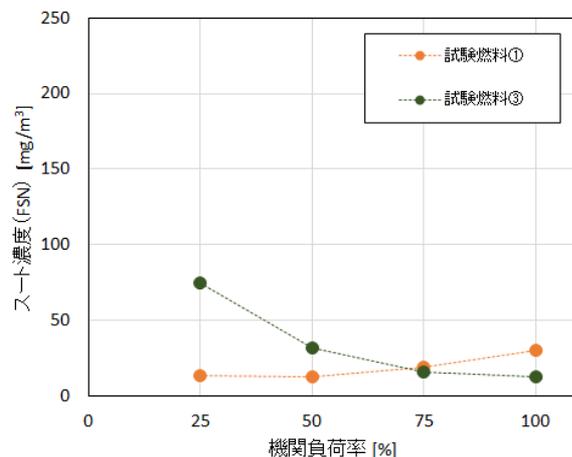
(b) THC濃度



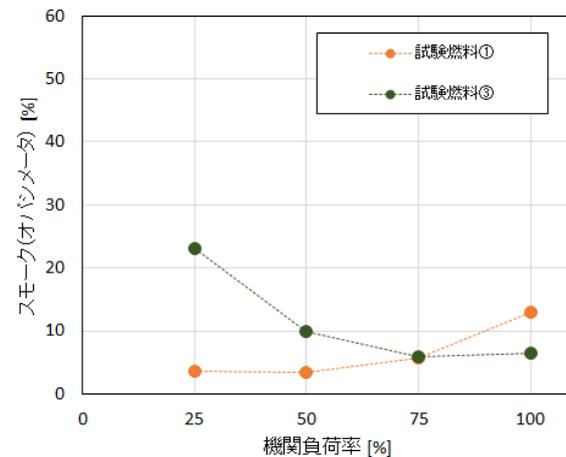
(c) CO濃度



(d) ストート濃度 (MSS)



(e) ストート濃度 (FSN)

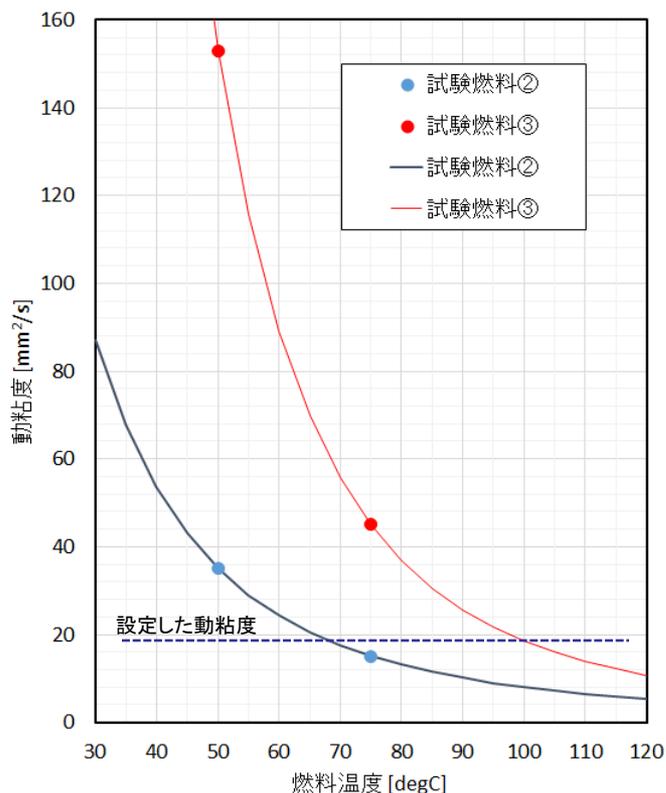


(f) スモーク濃度

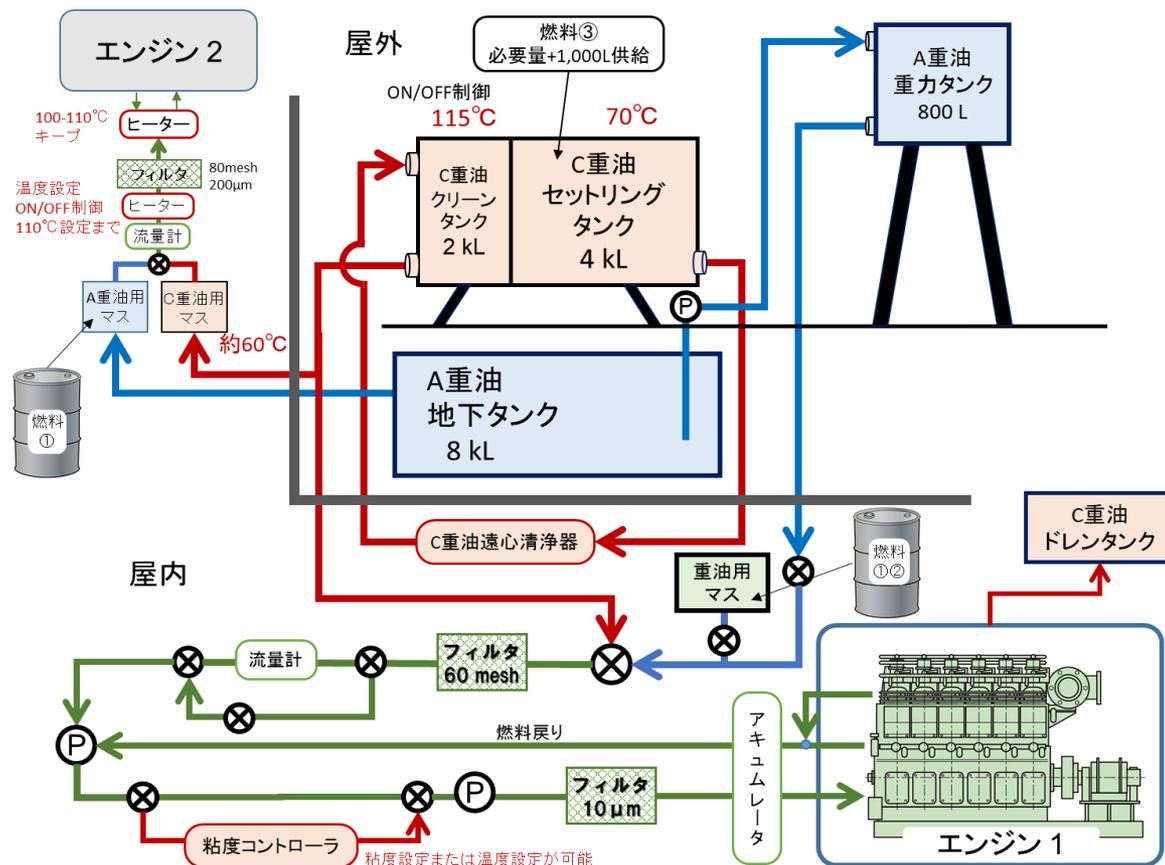
- 負荷率50%以上の範囲において、試験燃料①の排ガスは試験燃料③とほぼ同じ／問題ないレベルである。
- 試験燃料①の負荷率25%におけるストート濃度およびTHC濃度は試験燃料③と比べて低い。

## (1) 試験方法の概要

- 燃料温度と動粘度の関係から、使用可能な動粘度レベルになるように粘度コントロールを行った。
- 本燃焼試験では、動粘度を約18mm<sup>2</sup>/sにコントロールした。

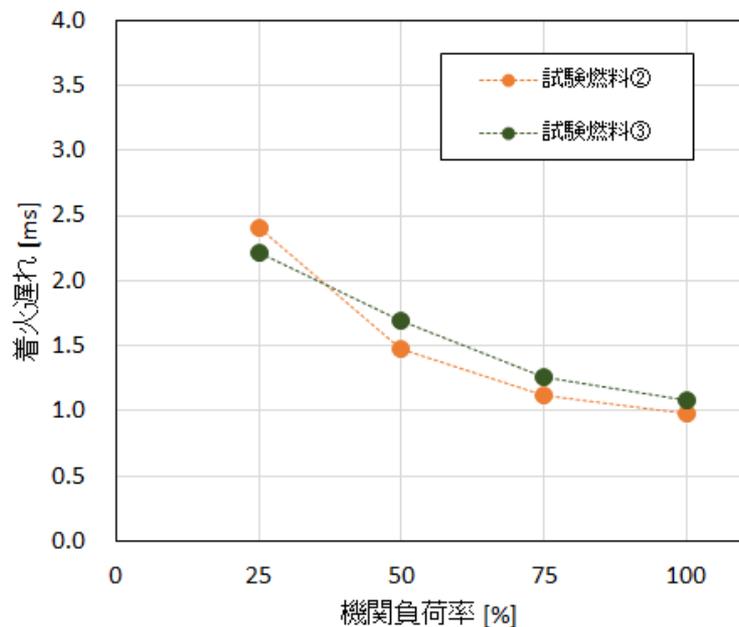


燃料温度に対する動粘度



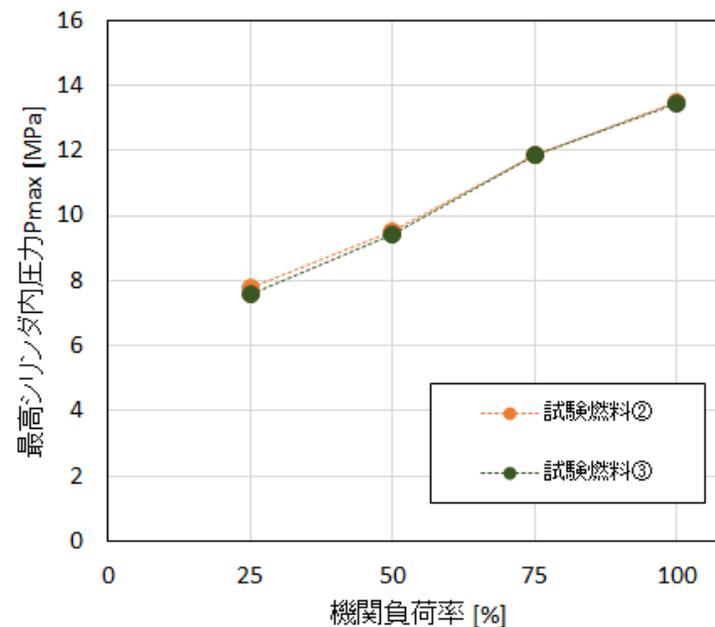
試験設備の概要

## (2) 着火遅れ・最高シリンダ内圧力



(a) 着火遅れ

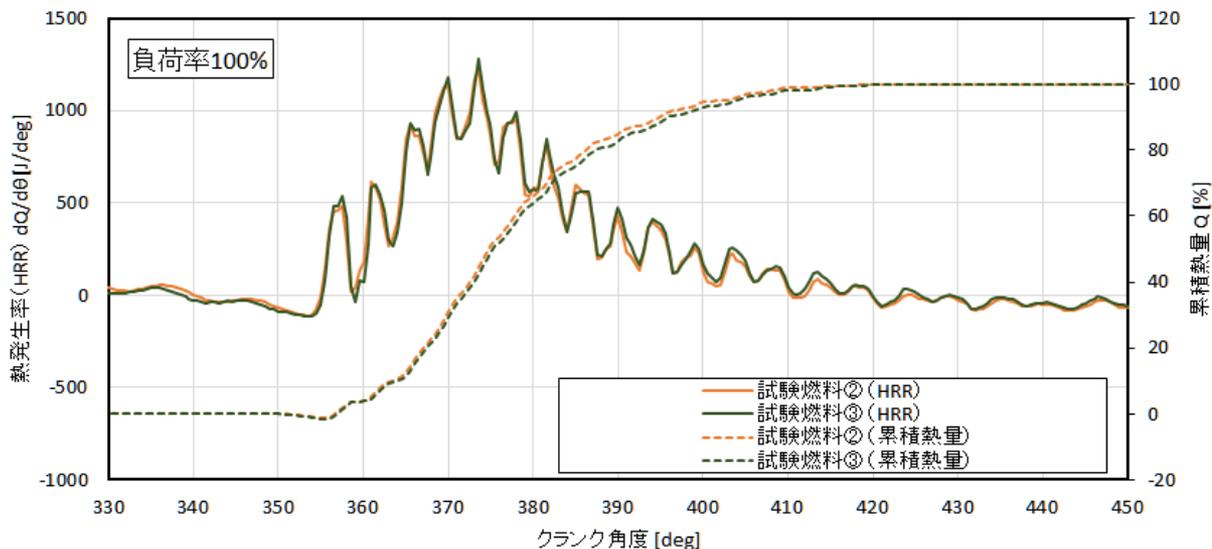
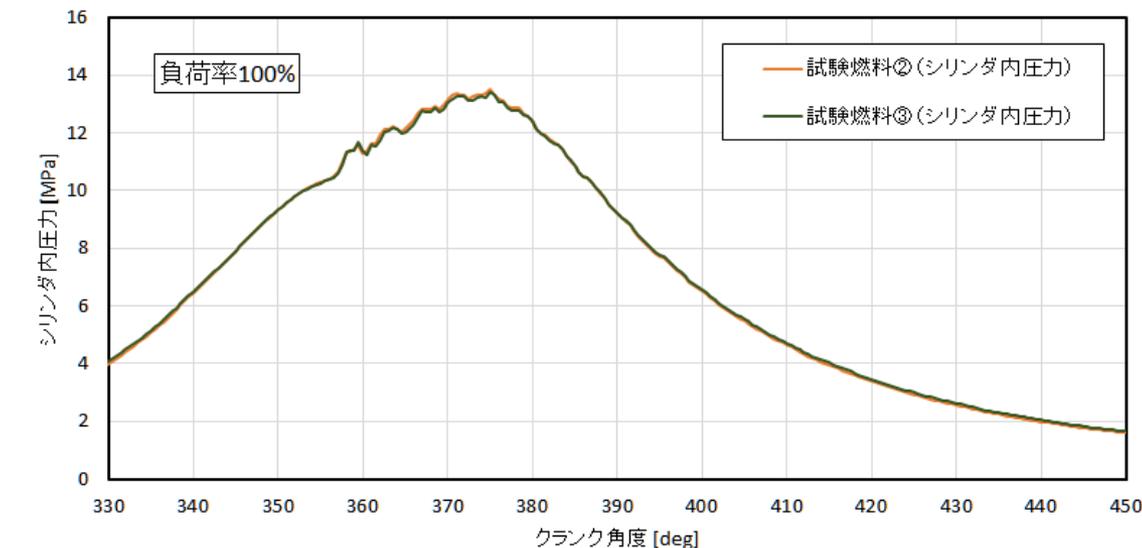
- 試験燃料②の着火遅れは試験燃料③とほぼ同じである。



(b) 最高シリンダ内圧力Pmax

- 試験燃料②の最高シリンダ内圧力は試験燃料③とほぼ同じである。

## (3) 圧力波形および熱発生率(負荷率100%)

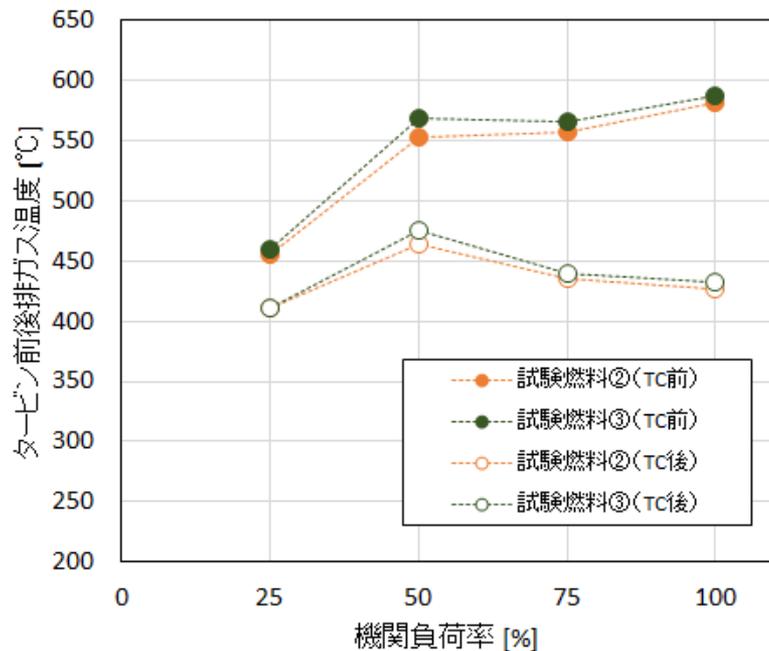


➤ 負荷率100%における試験燃料②と試験燃料③の圧力波形はほぼ重なっている。

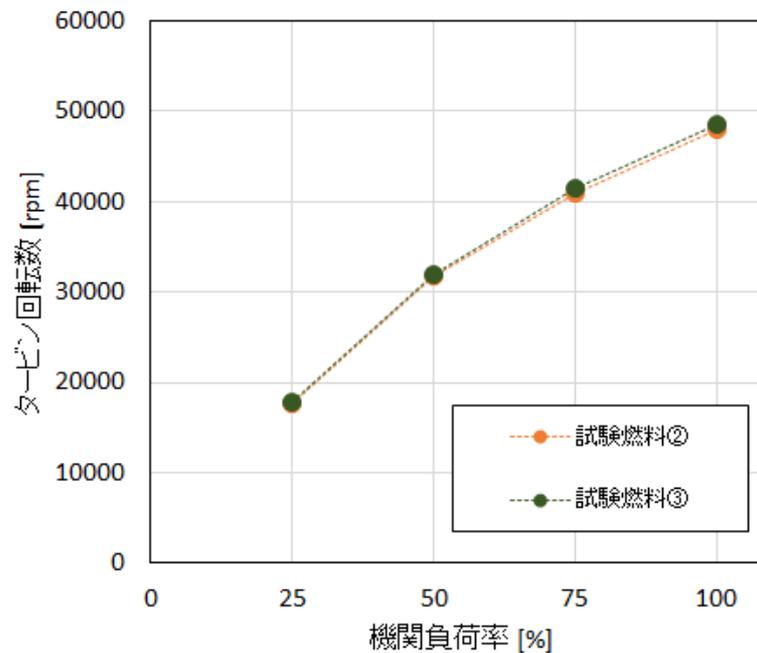
➤ 負荷率100%における熱発生率および累積熱量(燃焼期間に相当)は、燃料の影響をほとんど受けないことを確認した。

➤ 他の負荷率においてもほぼ同様の結果が得られており、圧力波形や熱発生率は燃料の影響をほとんど受けないことを確認した。

## (4) 排ガス温度・過給機特性



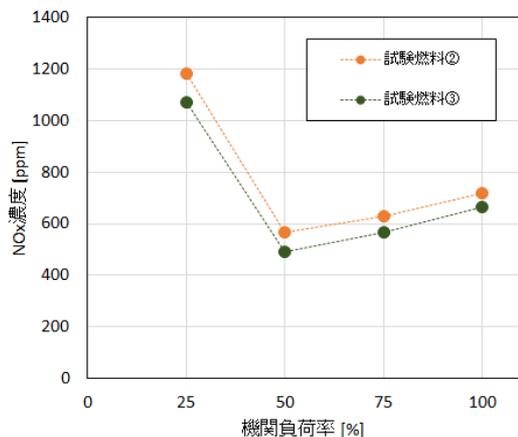
(a) タービン前後排ガス温度



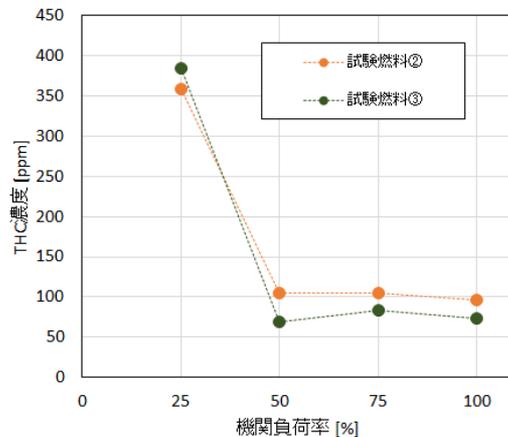
(b) タービン回転数

- タービン前後排ガス温度やタービン回転数は、燃料の影響をほとんど受けないことを確認した。

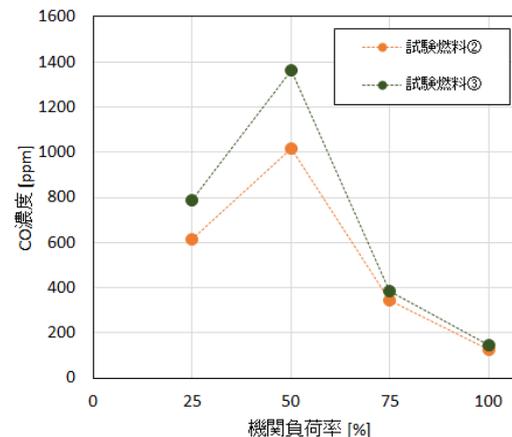
## (5) 排ガス性状



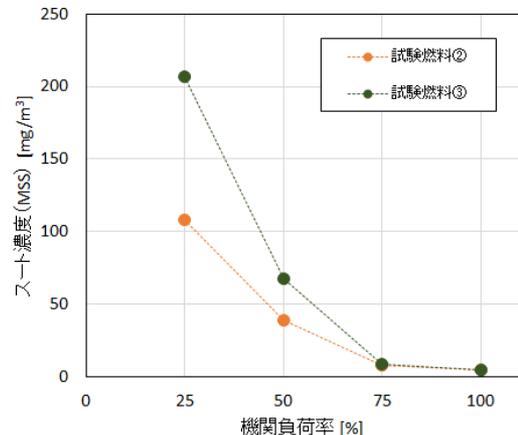
(a) NOx濃度



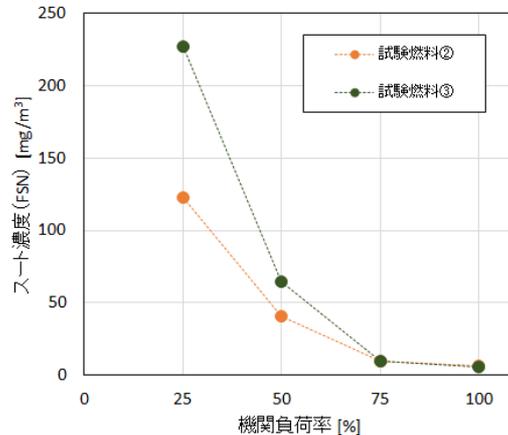
(b) THC濃度



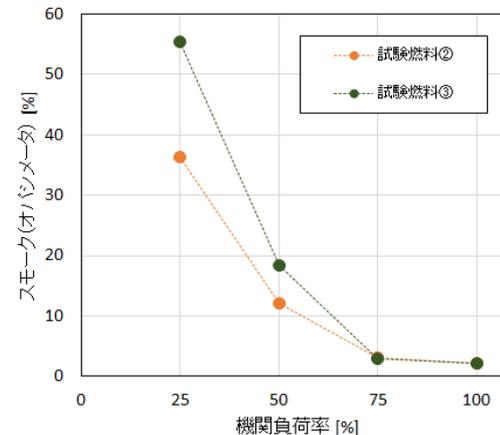
(c) CO濃度



(d) スート濃度 (MSS)



(e) スート濃度 (FSN)



(f) スモーク濃度

- 負荷率50%以上の範囲において、試験燃料①の排ガスは試験燃料③とほぼ同じ／問題ないレベルである。
- 試験燃料②の負荷率25%におけるスート濃度は試験燃料③と比べて低いが、試験燃料③と同様に注意が必要。
- 試験燃料②のその他の排ガス性状(NOx, THC, CO)は試験燃料③と同程度である。

- 試験燃料①から③について、2つの4ストロークディーゼルエンジンによる夏季燃焼試験を実施した結果は以下の通りである。
  - a. 試験燃料①による燃焼試験において、負荷率が50%以上の範囲(航海中の主な負荷率)では概ね試験燃料③(基準燃料)と同等な結果が得られており、燃料による燃焼状態の違いは小さいことが確認された。
  - b. 試験燃料②による燃焼試験において、燃料を適切に加熱することで、概ね試験燃料③(基準燃料)と同等な結果が得られており、燃料による燃焼状態の違いは小さいことが確認された。
- 以上のことから、試験燃料①及び②は従来のC重油と同様に使用できると考えられる。ただし、従来のC重油と同様、起動時や低負荷時の運転には注意が必要である。

注) 従来のC重油で注意が必要な負荷率が50%未満の範囲では、エンジンによっては、試験燃料①, 試験燃料②, 試験燃料③ともに注意すべき事象が見られた(燃焼開始時のシリンダ圧力変化及びスートやTHC(未燃燃料分)などの排ガス性状)。